



Slutrapport til Energistyrelsen for EFP 2001 projektet "DK-SOFC b, Langsigtet SOFC udvikling"

Mogensen, Mogens Bjerg

Publication date:
2002

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Mogensen, M. B. (2002). *Slutrapport til Energistyrelsen for EFP 2001 projektet "DK-SOFC b, Langsigtet SOFC udvikling"*. Forskningscenter Risø. Afdelingen for Materialeforskning.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Slutrapport til Energistyrelsen for EFP 2001 projektet "DK-SOFC b, Langsigtet SOFC udvikling", ENS-journal nr. 1713/01-0001

Engelsk resumé (abstract)

The project was carried out as a part of DK-SOFC 2000 - 20004. The DK-SOFC b line is targeted towards: 1) decrease of the operation temperature without increasing the area specific resistance, 2) increase of the robustness of the cell, 3) better understanding of mechanisms. The planned activities in the EFP 2001 project were: Cell test under extreme conditions, development and analysis of contacting, stability towards redox and thermal cycling, improvements of methods, development of materials and components.

The work was carried out approximately as planned. Some significant results are: An anode-supported cell with low internal resistance and good durability at 850°C has been developed. Contacting of ceramics to ceramics and to metallic interconnect was investigated. There are problems in obtaining stable contact. Poisoning of the cathode by chromium oxide was followed over prolonged periods, and also here problems were encountered. The results emphasize the importance of decreasing the operation temperature of SOFC further, down to the range of 550 - 650°C. New promising materials for electrodes have been synthesized.

Baggrund

Det overordnede formål med det danske SOFC program er at skabe mulighed for at etablere en dansk produktion af energiøkonomiske og miljøvenlige elproducerende anlæg eller dele hertil. På baggrund af resultater opnået i det danske SOFC program samt på baggrund af en betydelig dansk industriinteresse er der lagt en strategi for kommercialisering af SOFC-teknologien. Fortsættelsen af det hidtidige DK-SOFC projekt gennemføres i en række delprojekter i to linjer. Den ene linje med delvis PSO finansiering sigter mod løsning af kortsigtede problemer på vej mod demonstrationseksperimenter i Danmark af dansk celle- og stakningsteknologi. Den anden linje, hvor dette EFP 2001-projekt er anden del, er rettet mod: 1) nedbringelse af driftstemperaturen uden samtidig forøgelse af de arealspecifikke modstande, 2) forøgelse af robustheden ved hjælp af forbedrede materialer og komponenter, 3) forståelse af mekanismer i driftsrelevante processer. En vigtig del af denne linje er opbygning af knowhow med tilhørende patenter, der kan sikre en fordelagtig position i fremtidige industrielle samarbejder.

DK-SOFC b projektet er således en del af det strategiske grundlag for det femårige danske brændselscelleprogram, der er beskrevet i notatet "Plan for fortsættelse af det danske SOFC program, Mandskab, Tid og Penge, Rev. 6", Risø, 12. september 2000.

DK-SOFC b linjens langsigtede mål er nu:

- nedbringelse af den arealspecifikke indre modstand, ASR, så driftstemperaturer ned til 550°C kan realiseres

- levetids-analyse af den celletype, der i DK-SOFC a opskaleres til prepilotskala og øgning af levetid til 50000 timer eller mere
- forbedring af robusthed for komponenter, celler og stakke, både mekanisk og kemisk
- udvikling af elektroder, der tåler ubehandlet naturgas

DK-SOFC b danner rammen om dele af både den kortsigtede og den langsigtede danske forskningsindsats indenfor SOFC og sikrer udviklingen af de deltagende forskergrupper. Resultaterne bidrager til international forskning (se publikationslisten) og udvikling. Parallelt danner det grundlag for en kommerciel udnyttelse af SOFC teknologien i Danmark ved en løbende udvikling af mere robuste celler og stakke med lavere modstand. DK-SOFC b er tillige grundlaget for optimering af udbyttet af international projektdeltagelse.

Faglig målopfyldelse

Planen for EFP 2001 projektet indeholdt følgende aktiviteter:

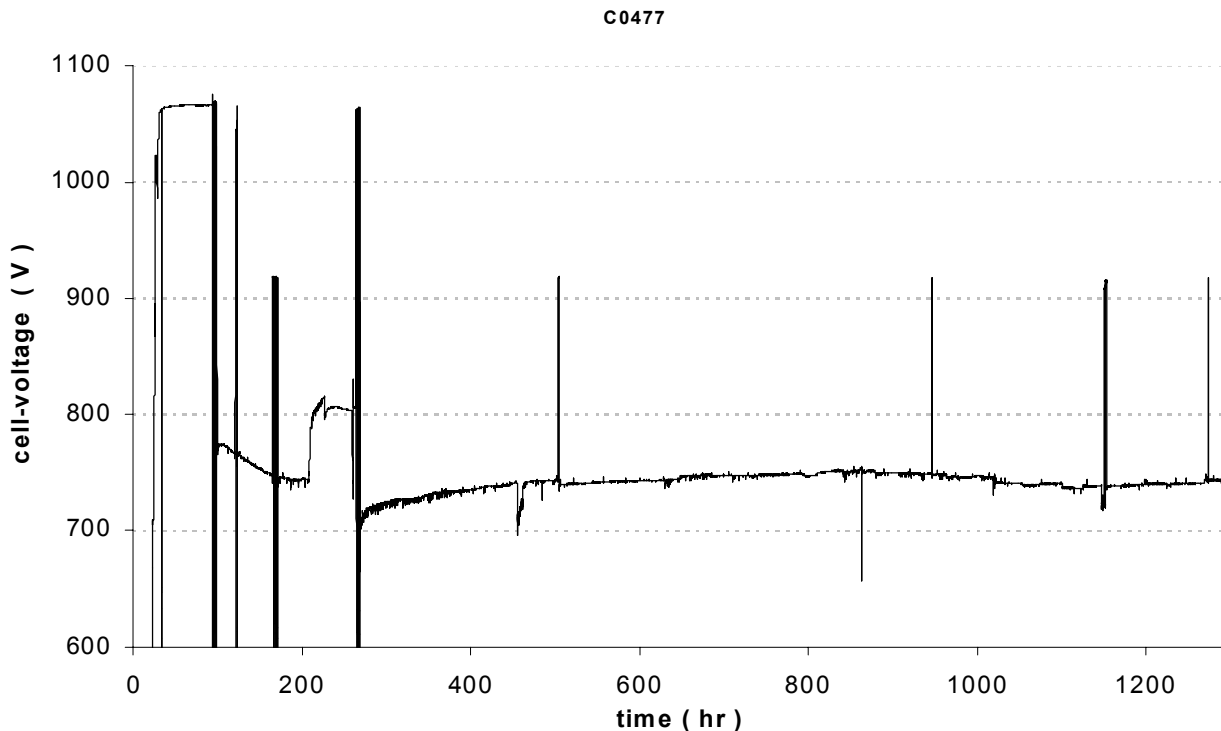
- Cellestest under ekstreme betingelser
- Kontakteringsanalyse og –udvikling
- Stabilitet overfor redox- og termiske cykler
- Metodikudvikling
- Materialeudvikling
- Komponentudvikling

I det følgende omtales hver punkt og nogle eksempler på resultater gives. Ud over de nævnte konkrete tekniske punkter, er der foregået en løbende publikation af resultater, se publikationslisten bagerst i rapporten.

Cellestest under ekstreme betingelser

En række celler blev testet efter at udviklingen af en ny anodebåren celle med et modificeret sintringsadditiv i hovedtrækkene var tilendebragt. Testresultaterne viste at elektrolytten i flere af cellerne var utætte. Derfor blev det nødvendigt som led i EFP 2001 projektet at videreudvikle cellefremstilling yderligere . Det lykkedes ved udgangen af året 2001 at nå frem til en celle, der lever op til de krav som Haldor Topsøe stiller for tiden. Et eksempel på et testresultat er vist i figur 1. Degraderingen efter de første 100 timer med $0,5 \text{ A/cm}^2$ var 4%, men derefter var der ingen væsentlig degradering over de næste 1000 timer. Faktisk var der en forbedring af cellens ydeevne henover tidspunktet 400 timer efter test start. Resultatet viser, at selv under relativt hårde testbetingelser, er det nødvendigt med meget længere test perioder end 1000 timer for at kunne give en sikker karakterisering af degraderingsopførslen af den type celler.

Yderligere tests af chromoxidforgiftning af LSM-YSZ-katoder på YSZ tre-elektrodepiller er gennemført ved 850°C med det eksperimentelle Sandvik stål (FeCr22) med forskellige coatings og med foroxideret Kanthal legering. I alle tilfælde blev der observeret en uacceptabel høj degraderings hastighed. Arbejdet fortsættes i EFP 2002 projektet.



Figur 1. Testresultat af en anodesupporteret celle ved ca. 850°C. Anodegassen var 50% H₂ + 50% H₂O og katodegassen var almindelig luft. Strømtæthed i perioderne med konstant belastning var 0,5 A/cm² svarende til en effekttæthed på ca. 0,7 W/cm², idet celledspændingen var ca. 0,74 V.

Kontakteringsanalyse og –udvikling

To typer af kontaktering studeret. 1) struktur og modstand i det oxidlag, som dannes spontant på overfladen af det chromstål, som anvendes som interconnect i stakken, og 2) kontaktmodstanden mellem to keramiske materialer. Dette har bl.a. været undersøgt i et ph.d.-studium finansieret af Forskerakademiet og Risø.

En række aspekter af punkt 1) er udført hos HTAS og på Risø i et samspil med et ph.d.-studium (finansieret af Risø). Resultaterne peger mod, at det er nødvendigt at beskytte stålet på både luft- og brændselsgassiden ved driftstemperaturer på 800 - 850°C. Derfor blev der i 2001 igangsat et andet ph.d.-studium (også Risø finansieret) med henblik på at klarlægge reaktionen mellem simple beskyttelseslag (pålagte) og chromoxidet, som dannes ved oxidationen. Desuden er det som direkte led i projektet pålagt forskellige beskyttende oxider på stålet, blandt andet doteret LaCrO₃, der er en oplagt kandidat til coatning på luftsiden. På brintsiden er der to muligheder under overvejelse. Den ene er Ni-metal, der dog næppe er hensigtsmæssig på sigt, hvis man skal nå frem til en redox-stabil celle. Den anden er at udvikle et metaloxid, der er elektronledende, men oxidation-isolerende, og som er stabil i anode gassen. En mulighed er et SrTiO₃-baseret oxid, se også afsnittet om nye materialer. En alternativ principiel mulighed for begge sider af stålet er pålægning af materialer, der kan reagere med det dårligt ledende chromoxid under dannelse af et blandingsoxid med tilstrækkelig høj ledningsevne. Dette undersøges også som led i sidstnævnte ph.d.-studium.

Vanskeligheden ved at finde et billigt stål som er tilstrækkeligt stabil og elektrisk ledende i overfladelaget ved temperaturer på 800 - 850°C leder frem til et ønske om at sænke driftstemperaturen yderligere ned til ca. 550 - 650°C.

Stabilitet overfor redox- og termiske cykler

Den manglende redoxstabilitet af den traditionelle Ni-YSZ-cermet anode skyldes, at den bliver mekanisk ødelagt ved oxidation af Ni til NiO, idet der sker en betydelig volumen udvidelse derved. Derfor har bestræbelserne været at mindske evt. helt fjerne Ni-indholdet i anoden. Blandede elektron- og oxidionledende materialer, specielt doteret ceriumdioxid og lanthanchromit har været undersøgt som alternative anoder. Resultatet af disse flerårige studier er, at en metalliske katalysatorer er nødvendig til at sørge for bindingsbrydning i gasmolekylerne (H_2 , CH_4). Ni er en oplagt kandidat, og med kun få procent Ni og den rigtige anodestruktur, synes der at være gode chancer for at kunne fremstille en redoxstabil anode. Det er dog nødvendigt med en meget bedre elektronleder til strømopsamlingen end ceriumdioxid og lanthanchromit. Derfor er der bestræbelser i gang for at finde en god elektronledende keramik til anodestrømsamler, se afsnittet Materialeudvikling. Hvis cellens driftstemperatur bliver sænket til omkring 600°C, vil porøst chromstål være en oplagt kandidat.

Stabiliteten over for termiske cykler er bestemt af cellens mekaniske styrke samt af residualspændingerne, som hovedsagelig skyldes manglende match af de termiske udvidelser af de forskellige materialeglag i cellen. Det er således ønskeligt at kunne bestemme de residuale spændinger i cellen, og i projektet er der forsøgt fortaget en bestemmelse af residualspændinger i de keramiske lag ved opmåling af krumningen af bilag (tolag). Der blev fremstillet cirkulære skiver (diameter ca. 100 mm) af "substrat". Coatingens tykkelse var henholdsvis 5 μm , 10 μm og 20 μm . Tynde lag ("coatings") blev pålagt skiverne ved sprøjtning. Følgende kunne konkluderes fra dette arbejde:

For YSZ/NiO-YSZ bilag, hvor udbøjningen var stor (i størrelsesordenen et par mm) giver metoden reproducerbare resultater. Kun for de tyndeste lag krummede multilagene sfærisk; for emner med større coatingtykkelse krummede emnerne uens i de to retninger. For emner med tynd coating (sfærisk krumning) blev der fundet god overensstemmelse mellem målt krumning og modelforudsigelser baseret på forskel i termisk udvidelse.

For LSM-YSZ/YSZ emnerne var krumningen så lille, at det eksperimentelt ikke var muligt at bestemme krumningen med tilstrækkelig nøjagtighed. Dette tilskrives, at dette multilag besidder en kombination af et tyndt lag med lav stivhed på et tykkere lag med højere stivhed.

Fremgangsmåden må derfor anses for rimelig anvendelig, men det kræves, at det er muligt at variere tykkelsen af lagene, idet der er risiko for enten meget små udbøjninger (giver stor usikkerhed på opmålingerne) eller store udbøjning (mulighed for ikke-sfærisk krumning).

Metodikudvikling

Tre nye celledteststande blev indkørt som led i projektet. Der har været udført (og der pågår fortsat) en indsats med at forbedre måle- og analysenøjagtigheden i celledtestene, idet det i sagens natur er vanskeligt at bestemme de meget små degraderingsrater på mindre end 1% per 1000 timer. Den eksisterende opfattelse af, at det er nødvendigt både at gennemføre langvarige tests på adskillige tusind timers varighed og stærkt accelererede tests, synes bekræftet. Der planlægges derfor bygning af yderligere fire teststande, som finansieres af HTAS.

Der er lavet et mindre arbejde med at forbedre målemetoden for elektrodepolarisationsmodstanden. For at mindske størrelsen af den serielle modstand, R_s , i de såkaldte tre-elektrodepiller, er der forsøgt med en afstand på ca. 0,1 mm mellem reference-elektroden og elektrolytoverfladen, samt udformning af arbejds-elektroden som en ring, der ikke overlapper med projektionen af hullet til reference-elektroden ud på overfladen. Dette midskede faktisk R_s med en faktor ca. 3. Det burde og være muligt at sænke den yderligere, så spørgsmålet tages sandsynligvis op igen i kommende projekter, idet behovet for at mindske R_s øges med lavere testtemperatur.

Materialeudvikling

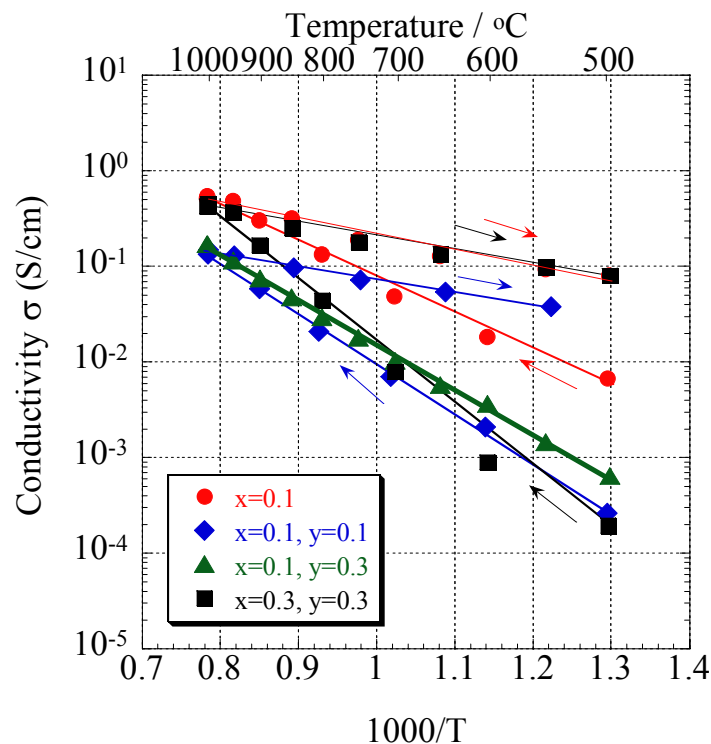
Under denne overskrift er der foregået såvel syntese af nye materialer som forsøg på at optimere elektrodestrukturer og sammensætninger. Det løbende arbejde har også i EFP 2001 bidraget med resultater som øger forståelsen af SOFC elektroderne. Eksempelvis ser det ud til, at mange af de additiver, der i litteraturen omtales som effektive katalysatorer i katoden for oxygenreduktionen (så som NiO) ikke har målelig virkning i gode LSM-YSZ-katoder. Forklaringen er sandsynligvis, at den fin-partikulære LSM allerede har en elektrokatalytiske evne, der overstiger additivernes. En konsekvens af denne hypotese er, at tilsætning af endnu finere LSM nanopartikler skulle kunne forbedre katoden. De eksperimentelle resultater synes at bekræfte denne hypotese. En konsekvens af hypotesen er, at en jævnere fordeling af endnu finere partikler i hele det aktive katodelag skal give en endnu bedre katode. Der er startet arbejde med at realisere en sådan katode, og de indledende resultater ser lovende ud.

Også i arbejdet med anoderne blev der gennemført en række forsøg med tilsætning af finere Ni-partikler. For flere typer elektroder med blandet elektron- og ionledningsevne, herunder ceriumdioxid, var der en meget kraftig effekt (2 til 3 gange lavere polarisationsmodstand) af tilsætning af få procent fin-fordelt Ni, mens der ikke var nogen effekt af en sådan tilsætning til Ni-YSZ-cermets.

En væsentlig indsats til øgning af elektrodeforståelsen er sket i et samspil med et ph.d. studium (finansieret af Nordisk Energiforskningsprojekt). Detaljerede mikroskopiske undersøgelser har vist at selv under anvendelse af overordentlig rene udgangsmaterialer, dannes der en kant af en sandsynligvis dårligt ledende glasfase på kontaktlinjen mellem en nikkeltråd og en YSZ-elektrolyt ved 1000°C. Også på grænsefladen mellem Ni og YSZ findes der fremmede grundstoffer. Sammenholdes disse observationer med egne og litteraturens resultater, er det nærliggende at konkludere, at en stor del af elektrodepolarisationsmodstanden i begge elektroder hidrører fra sådanne faser af segregeringer.

Arbejdet med forbedring af elektroderne fortsættes efter flere linjer, bl. a. ved en optimering af strukturen af grænsen mellem de kompositte elektroder og selve elektrolytten, samt ved tilsætning af additiver, der kan hindre, at den nævnte segregering af glas eller glaslignende faser finder sted.

Der er foretaget syntese og karakterisering af en række SrTiO_3 baserede materialer. Hensigten er at finde et keramisk materiale med en høj elektronledningsevne under reducerende betingelser. Det vides både fra tidligere DK-SOFC-arbejder og fra litteraturen, at sådanne materialer under visse omstændigheder kan have denne egenskab, men i de indtil nu undersøgte sammensætninger har enten ikke haft tilstrækkelig høj ledningsevne eller ikke været tilstrækkeligt stabile. En nye serie af sammensætninger med den generelle formel $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ti}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\alpha}$ er syntetiseret og karakteriseret med hensyn til struktur og elektrisk ledningsevne ud fra en hypotese om, at kombinationen af jern- og lanthanoxiddotering kunne forbedre ledningsevnen. Et eksempel på resultater er vist i Figur 2. Det ses, at hypotesen ikke holdt. Jernoxid tilsætningen giver en lavere ledningsevne. Næste træk er planlagt at være en optimering af lanthanoxidindholdet med hensyn til både stabilitet og ledningsevne.



Komponentudvikling

Det væsentligste arbejde er her IRDs fortsatte udvikling af stublag til gasfordeling i stakke og af metoder til at placere stubbene under staksamlingen.

Nye Ni/8YSZ emner er fremstillet ud fra optimerede råmaterialer (finkornet NiO med $d_{50\%} \approx 0.7 \mu\text{m}$, kun kalcineret 8YSZ og 0.4 vt% Al_2O_3 på oxidbasis) med et yderst tilfredsstillende resultat mht. grøndensitet (>60% TD), densitet efter sintring ved 1000°C ($\approx 69\%$ TD), styrke ($\approx 9 \text{ MPa}$), samt ”in-plane” ledningsevne efter reduktion og test ved 850°C ($\approx 1,450 \text{ S/cm}$).

Forskellige papirtyper er undersøgt med henblik på anvendelse som substratmateriale til stublagene. Der har været fokuseret på papirtyper med ringe askeindhold (<0.01 vt%) fremstillet af cellulose, grafit eller Abaca fibre i kvaliteter fra 8.5 g/m^2 til 80 g/m^2 . Ved trykløs sintring af stublag i samtlige papirsubstrater, på nær i grafitpapir, blev stubbene flyttet markant. Stubbene i grafitpapir stod efter trykløs sintring i samme arrangement, som før sintringen, men grafitpapir er for dyrt ($\approx 900 \text{ DDK/m}^2$) og for sprødt til stansning i den kvalitet, der er på markedet nu. Lovende forsøg med at stanse stubbene ud på paraffin- eller bivoks-belagt ($100 \mu\text{m}$) papir er udført. Stublag i paraffin eller bivoks kan relativt nemt overføres til et andet underlag, da paraffinen eller bivoksen smelter ved lav temperatur ($51\text{--}55^\circ\text{C}$) og papiret derved kan fjernes. Vand er med succes anvendt til at opnå tilstrækkelig vedhæftning mellem stubbene og tilsvarende keramik, samt mellem stubbene og metallisk interconnect (Fe22Cr), både i grøn og sintret tilstand. I sintret tilstand er

vedhæftningen mellem stubbene og underlaget tilstrækkelig til nænsom behandling, men god kontakt vil sandsynligvis først blive opnået under tryk.

Tidsplan

Arbejdet er gennemført i et langsommere tempo end planlagt i den oprindelige ansøgning. En ny plan med afslutning i 2002 blev godkendt af Energistyrelsen. Grunden til den langsommere afvikling af arbejdet var en midlertidig mangel på kvalificeret arbejdskraft grundet projektleder Carsten Baggers død i januar 2001 samt fratrædelse af to seniorforskere pr. 1. september 2001.

Fremtiden

Flere af aktiviteterne fortsætter under EFP2002, der dog især fokuserer på en begyndelsen af udviklingen af en 3. generations SOFC med driftstemperatur ned til 550°C.

Publikationer

De nedenfor listede publikationer har alle en eller anden tilknytning til enten EFP 2001 projektet eller de tidligere SOFC EFP-projekter, men naturligvis har også en række andre tidligere projekter bidraget til de publicerede resultater.

1. Appel, C.C.; Bonanos, N.; Horsewell, A.; Linderroth, S., Ageing behaviour of zirconia stabilised by yttria and manganese oxide. *J. Mater. Sci.* (2001) v. 36 p. 4493-4501
2. Bonanos, N., Oxide-based protonic conductors: Point defects and transport properties. *Solid State Ionics* (2001) v. 145 p. 265-274
3. Fossdal, A.; Sagdahl, L.T.; Einarsrud, M.A.; Wiik, K.; Grande, T.; Larsen, P.H.; Poulsen, F.W., Phase equilibria and microstructure in $\text{Sr}_4\text{Fe}_{6-x}\text{Co}_x\text{O}_{13}$ $0 \leq x \leq 4$ mixed conductors. *Solid State Ionics* (2001) v. 143 p. 367-377
4. Glerup, M.; Nielsen, O.F.; Poulsen, F.W., The structural transformation from the pyrochlore structure, $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$, to the fluorite structure, AO_2 , studied by Raman spectroscopy and defect chemistry modeling. *J. Solid State Chem.* (2001) v. 160 p. 25-32
5. Hansen, J.R.; Larsen, P.H.; Hendriksen, P.V.; Mogensen, M., Dimensionally stable electronic or mixed conducting material. DK patentansøgning PA 2000 01703
6. Holtappels, P.; Bradley, J.; Irvine, J.T.S.; Kaiser, A.; Mogensen, M., Electrochemical characterization of ceramic SOFC anodes. *J. Electrochem. Soc.* (2001) v. 148 p. A923-A929
7. Jacobsen, T.; Zachau-Christiansen, B.; Bay, L.; Juhl Jørgensen, M., Hysteresis in the solid oxide fuel cell cathode reaction. *Electrochim. Acta* (2001) v. 46 p. 1019-1024
8. Jensen, K.V.; Primdahl, S.; Chorkendorff, I.; Mogensen, M., Microstructural and chemical changes at the Ni/YSZ interface. *Solid State Ionics* (2001) v. 144 p. 197-209
9. Juhl Jørgensen, M., Lanthanum manganate based cathodes for solid oxide fuel cells. Risø-R-1242(EN) (2001) 167 p. (ph.d. thesis) www.risoe.dk/rispubl/AFM/ris-r-1242.htm
10. Juhl Jørgensen, M.; Linderroth, S.; Bagger, C.; Mogensen, M.; Hendriksen, P.V.; Kindl, B.; Larsen, P.H.; Primdahl, S.; Bonanos, N.; Poulsen, F.W., Development and scale-up of anode-supported SOFC. In: Proceedings. Materialsweek 2000, München (DE), 25-28 Sep 2000.

(Werkstoffwoche-Partnerschaft, 2001 (The proceedings are available for two years from publication date)) 8 p. <http://www.materialsweek.org/proceedings/index.htm>

11. Juhl Jørgensen, M.; Mogensen, M., Impedance of solid oxide fuel cell LSM/YSZ composite cathodes. *J. Electrochem. Soc.* (2001) v. 148 p. A433-A442
12. Juhl Jørgensen, M.; Primdahl, S.; Bagger, C.; Mogensen, M., Effect of sintering temperature on microstructure and performance of LSM-YSZ composite cathodes. *Solid State Ionics* (2001) v. 139 p. 1-11
13. Jørgensen, M.J.; Bonanos, N.; Mogensen, M., Correlation between impedance, activation energy and microstructure of composite $(\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{yMnO}_{3-\delta}/\text{Zr}_{1-z}\text{Y}_z\text{O}_{2-0.5z}$ cathodes. In: Proceedings. 7. International symposium on solid oxide fuel cells (SOFC 7), Tsukuba (JP), 5-8 Jun 2001. Singhal, S.C.; Yokokawa, H. (eds.), (Electrochemical Society, Pennington, NJ, 2001) (Proceedings volume PV 2001-16) p. 547-554
14. Kek, D.; Bonanos, N., Investigation of hydrogen oxidation reaction on a metal/perovskite proton conductor interface by impedance spectroscopy. *Vacuum* (2001) v. 61 p. 453-457
15. Kek, D.; Mogensen, M.; Pejovnik, S., A study of metal (Ni, Pt, Au)/yttria-stabilized zirconia interface in hydrogen atmosphere at elevated temperature. *J. Electrochem. Soc.* (2001) v. 148 p. A878-A886
16. Larsen, P.H.; Bagger, C.; Linderoth, S.; Mogensen, M.; Primdahl, S.; Jørgensen, M.J.; Hendriksen, P.V.; Kindl, B.; Bonanos, N.; Poulsen, F.W.; Maegaard, K.A., Status of the Danish SOFC program. In: Proceedings. 7. International symposium on solid oxide fuel cells (SOFC 7), Tsukuba (JP), 5-8 Jun 2001. Singhal, S.C.; Yokokawa, H. (eds.), (Electrochemical Society, Pennington, NJ, 2001) (Proceedings volume PV 2001-16) p. 28-37
17. Linderoth, S.; Bonanos, N.; Jensen, K.V.; Bilde-Sørensen, J.B., Effect of NiO-to-Ni transformation on conductivity and structure of yttria-stabilized ZrO_2 . *J. Am. Ceram. Soc.* (2001) v. 84 p. 2652-2656
18. Mikkelsen, L.; Larsen, P.H.; Linderoth, S., High temperature oxidation of Fe_{22}Cr -alloy. *J. Therm. Anal. Calorim.* (2001) v. 64 p. 879-886
19. Mikkelsen, L.; Skou, E., Determination of the oxygen chemical diffusion coefficient in perovskites by a thermogravimetric method. *J. Therm. Anal. Calorim.* (2001) v. 64 p. 873-878
20. Mogensen, M.; Primdahl, S.; Jensen, K.V.; Jørgensen, M.J.; Bagger, C., Foreign phases and SOFC electrode kinetics. In: Proceedings. 7. International symposium on solid oxide fuel cells (SOFC 7), Tsukuba (JP), 5-8 Jun 2001. Singhal, S.C.; Yokokawa, H. (eds.), (Electrochemical Society, Pennington, NJ, 2001) (Proceedings volume PV 2001-16) p. 521-528
21. Palsson, J.; Selimovic, A.; Hendriksen, P.V., Intermediate temperature SOFC in gas turbine cycles. In: Proceedings. ASME turbo expo 2001, New Orleans, LA (US), 4-7 Jun 2001. (ASME International, New York, 2001) 8 p.
22. Poulsen, F.W. (ed.), Danish Solid Oxide Fuel Cell project: DK-SOFC 1997-1999. (2001) 30 p.

23. Poulsen, F.W., Speculations on the existence of hydride ions in proton conducting oxides. *Solid State Ionics* (2001) v. 145 p. 387-397
24. Primdahl, S.; Hansen, J.R.; Grahl-Madsen, L.; Larsen, P.H., Sr-doped LaCrO₃ anode for solid oxide fuel cells. *J. Electrochem. Soc.* (2001) v. 148 p. A74-A81
25. Primdahl, S.; Hendriksen, P.V.; Larsen, P.H.; Kindl, B.; Mogensen, M., Evaluation of SOFC test data. In: Proceedings. 7. International symposium on solid oxide fuel cells (SOFC 7), Tsukuba (JP), 5-8 Jun 2001. Singhal, S.C.; Yokokawa, H. (eds.), (Electrochemical Society, Pennington, NJ, 2001) (Proceedings volume PV 2001-16) p. 932-941